

Paging in IP-basierten Mobilkommunikationsnetzen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Informatik
der Universität Fridericiana zu Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Marco Liebsch

aus Heidelberg

Tag der mündlichen Prüfung:

12. November 2007

Erster Gutachter:

Prof. Dr. Martina Zitterbart

Zweiter Gutachter:

Prof. Dr. Dieter Hogrefe

Berichte aus der Telematik

Marco Liebsch

**Paging in IP-basierten
Mobilkommunikationsnetzen**

Shaker Verlag
Aachen 2008

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7632-4

ISSN 0948-700X

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit bei den NEC Laboratories Europe in Heidelberg. Die Thematik der Arbeit entwickelte sich aus Forschungsarbeiten in den EU-Projekten Moby Dick und Daidalos, die im Rahmen der Dissertation weiter vertieft werden konnten.

Für die Betreuung der Arbeit an der Universität Karlsruhe möchte ich Frau Prof. Dr. Martina Zitterbart vom Institut für Telematik danken. Ihre Vorschläge und Anregungen waren insbesondere bei der Entscheidung zur simulativen Leistungsbewertung wegweisend und haben sehr zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für die bereitwillige und freundliche Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr. Dieter Hogrefe von der Universität Göttingen.

Besonders möchte ich Herrn Dr. Heinrich Stüttgen für die Möglichkeit danken, das Thema dieser Dissertation mit den Forschungsinteressen von NEC in Verbindung zu bringen. Das ausgeprägte Interesse der NEC Laboratories Europe an diesem Thema, die Unterstützung beim Veröffentlichen der Forschungsergebnisse durch Konferenzbeiträge und die Möglichkeit, Ergebnisse zum Thema dieser Arbeit in die Forschungs- und Standardisierungsgruppen der Internet Engineering Task Force einzubringen und durch die Teilnahme an Tagungen zu diskutieren, haben wesentlich zur Durchführung meiner Arbeit beigetragen.

Weiterer Dank geht an Gerrit Renker und Gerrit Otte, die im Rahmen einer Diplomarbeit und eines Praktikanten-Projektes in hohem Maße bei der Spezifikation und einer Prototyp-Implementierung der grundlegenden Paging-Konzepte mitgewirkt haben.

Für die Offenheit und Bereitwilligkeit zur Diskussion im Zusammenhang mit dieser Arbeit möchte ich meinen NEC-Kollegen Dr. Bernd Lamparter, Dr. Xavier Pérez-Costa, Daniel Camps-Mur, Dr. Dirk Westhoff und Dr.-Ing. Andreas Festag danken. Für die kollegiale Integration danke ich an dieser Stelle auch den Mitarbeitern des Instituts für Telematik an der Universität Karlsruhe, die gegenüber meinen Fragen als externer Doktorand stets Offenheit zeigten. Besonders möchte ich hierfür Dr. Roland Bless, Dr. Christian Vogt, Dr. Uwe Walter und Dr. Erik-Oliver Blaß danken. Weiterer Dank geht an James Kempf für die oftmals kritischen, jedoch stets hilfreichen Kommentare im Rahmen der Diskussionen über IP-Paging innerhalb der Internet Engineering Task Force.

Die Lesbarkeit dieser Dissertation wurde wesentlich durch gewissenhafte Korrektur verbessert, wofür ich Raimund Frings und Dr. Eckhart Körner danken möchte.

An dieser Stelle möchte ich mich auch bei meiner Familie und besonders bei meiner Lebensgefährtin Daniela Schäfer bedanken, die oftmals auf meine Anwesenheit verzichten mussten, mich jedoch in vielfältiger Weise bei der Durchführung meiner Ziele unterstützten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problembeschreibung	2
1.2	Überblick über die Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Mobilität und Erreichbarkeit	6
2.2	Zelluläre Netze der dritten Generation	10
2.3	IP-basierte Protokolle für Mobilitätsmanagement	13
2.3.1	Routing-basierte Verfahren	13
2.3.2	Auf Readressierung basierende Verfahren	15
2.3.3	Weitere Verfahren	20
2.4	Was darf Erreichbarkeit kosten?	22
2.4.1	Voraussetzungen und Kosten für Erreichbarkeit	22
2.4.2	Reduzierte Aktivität und Paging-Verfahren	23
2.5	Paging Areas und Paging-Strategien	27
2.6	Anforderungen an IP-basierte Lösungskonzepte	30
2.6.1	Funktionale Anforderungen	30
2.6.2	Sicherheitsrelevante Anforderungen	31
2.7	Funktionale Komponenten für Paging-Konzepte	32
2.8	Hilfsmittel zur Evaluierung von Protokollen	36
2.8.1	Analytische Modelle	36
2.8.2	Simulationen mit OMNeT++	37
3	Stand der Forschung	43
3.1	Paging in Cellular-IP(v6)-Netzwerken	44
3.2	Paging in HAWAII-Netzwerken	46
3.3	MIRP - Mobile IP Regional Paging	48
3.4	Regionales Paging für Hierarchisches Mobile IPv6	50

3.5	Paging in IDMP-Netzwerken	50
3.6	P-MIP für Mobile IPv4	52
3.7	LAHAP	54
3.8	Last Hop DMHA	55
3.9	Zusammenfassender Überblick	57
4	FP²: Das Flexible Paging-Protokoll	59
4.1	Überblick über den Designansatz	59
4.2	Design der Architekturkomponenten	60
4.3	Die Basiskonzeption des FP ²	65
4.3.1	Die FP ² -Signalisierungsnachrichten	65
4.3.2	Die FP ² -Protokollschnittstellen	69
4.3.3	Die FP ² -Signalisierungssequenzen	69
4.3.3.1	Registrierung mit dem Paging Controller	72
4.3.3.2	Aktualisieren der registrierten Paging Area	73
4.3.3.3	Die Paging-Prozedur	73
4.3.4	Identifizierung und Adressierung von mobilen Geräten im Ruhezustand	75
4.3.5	Sicherheitsaspekte des FP ² -Konzeptes	77
4.4	Die Konzeptintegration mit Mobile IPv6	81
4.4.1	Die Dormant-Modus-Registrierung	83
4.4.2	Wechsel der Paging Area	85
4.4.3	Reaktivierung durch die Paging-Prozedur	87
5	Integration der IEEE 802.11-Technologie	91
5.1	Verwendung von Energiesparmodi mit Paging	92
5.2	Der IEEE 802.11-Energiesparmodus	96
5.2.1	Überblick über die Standardmechanismen	96
5.2.2	Einschränkungen bei Verwendung des Energiesparmodus im Ruhezustand	99
5.3	Transparente Integration durch Verwendung der DTIM Counter	102
5.4	Integration durch Verwendung von NAIDs	106
5.5	Zusammengefasst - Adressierung und Identifizierung	110

6	Evaluierung anhand analytischer und simulativer Verfahren	113
6.1	Überblick über die durchgeführte Evaluierung	114
6.2	Analytische Evaluierung	115
6.2.1	Signalisierungskosten	115
6.2.2	Kosten bei Verwendung der IEEE 802.11 DTIM Counter	124
6.2.3	Paging-Latenzzeit bei Verwendung der IEEE 802.11 TIM	129
6.3	Simulative Evaluierung	136
6.3.1	Die Erweiterung der Simulationsumgebung	136
6.3.1.1	Entwicklung und Integration der FP ² -Module	136
6.3.1.2	Implementierung von Energiesparmodus und TIM-basiertem Paging	139
6.3.1.3	Modell zur Bestimmung der Leistungsaufnahme	141
6.3.2	Netzwerktopologie für die simulative Evaluierung	144
6.3.3	Verzögerung bei Multicast-basierten Paging-Aufrufen	147
6.3.4	Verzögerung bei TIM-basierten Paging-Aufrufen	150
6.3.5	Evaluierung der Leistungsaufnahme bei mobilen Geräten	151
6.3.6	Untersuchung der Verlustrate von initialen Nutzdaten	155
6.4	Zusammenfassung der Evaluierung	159
7	Zusammenfassung und Ausblick	161
A	Abkürzungsverzeichnis	165
B	Format der FP²-Signalisierungsnachrichten	169
B.1	Dormant Request	169
B.2	Dormant Reply	170
B.3	Paging Request	170
B.4	Format der ICMP-Optionen	171
C	Formale Beschreibung der FP²-Komponenten	173
C.1	Paging Attendant	173
C.2	Paging Controller	174
C.3	Mobiles Gerät	177
	Literaturverzeichnis	181
	Index	188

Abbildungsverzeichnis

2.1	Netzwerkarchitektur mit Komponenten des Standards Mobile IPv6.	8
2.2	Schematische Darstellung der UMTS-Architektur.	11
2.3	Aktualisierung von Routing-Zuständen im Netzwerk durch Paging.	25
2.4	Strukturierung von Zugangsnetzen in Funkzellen, IP-Subnetze und Paging Areas.	26
2.5	Klassifizierung von Paging-Strategien.	27
2.6	Verteilung der funktionalen Komponenten im Fremdnetz.	35
2.7	Verteilung der funktionalen Komponenten im Fremd- und Heimatnetz. . . .	36
2.8	Verbindung von einfachen und zusammengesetzten Modulen.	38
2.9	Zusammengesetztes Modul eines Routers in der IPv6 Protokoll-Suite.	40
2.10	Zusammengesetztes Modul eines IEEE 802.11-Zugangspunktes in der IPv6 Protokoll-Suite.	41
3.1	Klassifizierung verschiedener Lösungskonzepte.	44
3.2	Implizites Paging beim Protokoll Cellular IPv6.	45
3.3	Explizites Paging in HAWAII-Netzen.	48
3.4	Architektur des Intra Domain Mobility Management Protocol (IDMP). . . .	51
3.5	Paging nach P-MIP durch einen nicht registrierten Foreign Agent.	53
3.6	Verteilte Paging-Komponenten bei der LAHAP-Architektur.	55
3.7	Verteilte Paging-Komponenten bei der LH-DMHA-Architektur.	56
4.1	Darstellung der Architekturkomponenten des FP ² , bestehend aus einem Paging Controller und verteilten Paging-Attendant-Komponenten	64
4.2	Protokollschnittstellen zwischen einem mobilen Gerät, einem Paging Attendant und einem Paging Controller.	70
4.3	Das Format der IPv6 Solicited-Node Multicast-Adresse	77
4.4	Format des Signalisierungsparameters <i>Paging ID</i>	78
4.5	Aufbau einer direkten Sicherheitsverbindung zwischen einem mobilen Gerät und einem Paging Controller über bestehende Sicherheitsverbindungen. . . .	80

4.6	Schematische Darstellung einer Mobile-IPv6-Architektur und der für die modulare Integration von FP ² relevanten Netzwerkkomponenten.	83
4.7	<i>Paging Controller Discovery</i> mit impliziter <i>Dormant-Registrierung</i>	84
4.8	Signalisierungsfluss für das Aktualisieren der mit dem Paging Controller registrierten <i>Paging Area</i> ohne (a) und mit (b) Unterstützung der Zugangstechnologie	86
4.9	Signalisierungsfluss einer Paging-Prozedur mit erfolgreicher Reaktivierung und Registrierung des mobilen Gerätes	88
5.1	Eigenschaften einiger drahtloser Zugangstechnologien.	93
5.2	Anbindung einer mobilen Station an einen IEEE 802.11-Zugangspunkt. . . .	98
5.3	Format der Traffic Indication Map.	99
5.4	Verwendung der DTIM Counter zur kontrollierten Übertragung von IP Multicast-basierten Paging-Aufrufen an mobile Geräte im Energiesparmodus. . .	104
5.5	Gemeinsame Abbildung von AID und NAID in der partiellen virtuellen Bitmap der IEEE 802.11 TIM.	108
5.6	Kontrollierte Ansteuerung der für Paging relevanten partiellen virtuellen Bitmap durch den Paging Controller.	109
5.7	Verwendung von NAIDs zur Steuerung von TIM-basierten Paging-Aufrufen. .	110
6.1	Darstellung des Netzwerkmodells	117
6.2	Signalisierungskosten von FP ² und Mobile IP für verschiedene Distanzen, über die der Paging Controller mit den Zugangsroutern im Zugangsnetz verbunden ist.	121
6.3	Signalisierungskosten von P-MIP und Mobile IP bei einer Distanz von 8 Hops im Zugangsnetz und parametrisierter Distanz zwischen Zugangsroutern. . . .	122
6.4	Signalisierungskosten von FP ² und P-MIP für verschiedene Distanzen, über die der Paging Controller mit den Zugangsroutern im Zugangsnetz verbunden ist.	123
6.5	Modell zur Evaluierung der durch Paging und den Energiesparmodus verursachten Latenzzeit.	126
6.6	Bestimmung der durch den Zugangspunkt beigetragenen probabilistischen Komponente zur Paging-Latenzzeit.	126
6.7	Bestimmung der Energiekosten aus der Aktivität des mobilen Gerätes zwischen zwei Datensitzungen.	128
6.8	Zusammengefasste Kosten, die Paging-Latenzzeit und Energieverbrauch berücksichtigen.	129
6.9	Modell zur Evaluierung der durch Paging und den Energiesparmodus verursachten Verzögerung.	131
6.10	Modell zur Veranschaulichung der durch den Energiesparmodus beigetragenen probabilistischen Komponente zur Verzögerung.	131

6.11 Darstellung der Blockierungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit des Parameters Listen Interval und der Leitungsverzögerung.	133
6.12 Darstellung der Blockierungswahrscheinlichkeit bei konstanter drahtloser Verzögerung und einer Leitungsverzögerung von 5 ms, 50 ms und 100 ms.	135
6.13 Darstellung der Blockierungswahrscheinlichkeit bei konstanter Leitungsverzögerung und einer drahtlosen Uplink-Verzögerung von 5 ms, 50 ms und 100 ms.	135
6.14 Design und Integration der für FP ² relevanten Module innerhalb des zusammengesetzten Moduls <i>networkLayer</i>	138
6.15 Darstellung der integrierten FP ² -Module im Simulator.	140
6.16 Modellhafte Trennung der IEEE 802.11-Komponenten vom mobilen Gerät zur Bestimmung der Leistungsaufnahme.	142
6.17 Exemplarische Darstellung der vier Leistungszustände bei IEEE 802.11.	143
6.18 Gewählte Netzwerktopologie für die simulative Evaluierung.	144
6.19 Darstellung der Netzwerktopologie durch den Simulator.	145
6.20 Paging-Latenzzeit bei Multicast-basierten Paging-Aufrufen.	148
6.21 Kollisionsbedingte wiederholte Übertragung von Paging-Aufrufen.	149
6.22 Simulative Evaluierung der Blockierungswahrscheinlichkeit.	151
6.23 Leistungsaufnahme ohne Energiesparmodus bei kurzem Sitzungsintervall.	154
6.24 Leistungsaufnahme ohne Energiesparmodus bei langem Sitzungsintervall.	154
6.25 Leistungsaufnahme mit Energiesparmodus bei kurzem Sitzungsintervall.	156
6.26 Leistungsaufnahme mit Energiesparmodus bei langem Sitzungsintervall.	156
6.27 Verlustrate von Mobile IPv6 und FP ² bei Multicast-basierten Paging-Aufrufen.	158
6.28 Verlustrate von FP ² bei Multicast- und TIM-basierten Paging-Aufrufen.	158
 B.1 Format der Signalisierungsnachricht <i>Dormant Request</i> (DORM REQ)	169
B.2 Format der Signalisierungsnachricht <i>Dormant Reply</i> (DORM REPL)	170
B.3 Format der Signalisierungsnachricht <i>Paging Request</i> (PAGING REQ)	170
B.4 Formatierung der Nachrichten-Parameter	171
 C.1 Flussdiagramm Paging Attendant.	174
C.2 Flussdiagramm Paging Controller für DMHA- und TA-Komponente.	175
C.3 Flussdiagramm Paging Controller für DMA-Komponente.	176
C.4 Flussdiagramm Mobiles Gerät (1/2).	178
C.5 Flussdiagramm Mobiles Gerät (2/2).	179

Tabellenverzeichnis

4.1	Aufstellung der für die Dormant-Modus-Registrierung verwendeten Signalisierungsnachrichten und Parameter.	85
4.2	Aufstellung der für die Aktualisierung der Paging Area verwendeten Signalisierungsnachrichten und Parameter.	87
4.3	Aufstellung der für die Paging-Prozedur verwendeten Signalisierungsnachrichten und Parameter.	88
5.1	Eigenschaften einiger Zugangstechnologien hinsichtlich der Unterstützung eines leistungsreduzierten Modus und Paging.	94
5.2	Zustandspezifische Identifizierung und Adressierung von mobilen Geräten. . .	111
6.1	Wahl der Parameter für die Evaluierung der Signalisierungskosten.	119
6.2	Zustandsabhängige Leistungsaufnahme der IEEE 802.11-Schnittstelle.	152